



Politechnika Śląska

PROJEKT INŻYNIERSKI

Analiza błędów pomiaru położenia platformy mobilnej

Daniel CHYDZIŃSKI

Nr albumu: 296781

Kierunek: Automatyka i Robotyka

Specjalność: Automatyka Procesowa

PROWADZĄCY PRACĘ

dr Aleksander Staszulonek

KATEDRA Automatyki i Robotyki

Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

Gliwice 2023

Tytuł pracy

Analiza błędów pomiaru położenia platformy mobilnej

Streszczenie

(Streszczenie pracy – odpowiednie pole w systemie APD powinno zawierać kopię tego streszczenia.)

Słowa kluczowe

(2-5 slow (fraz) kluczowych, oddzielonych przecinkami)

Thesis title

Mobile platform position errors analysis

Abstract

(Thesis abstract – to be copied into an appropriate field during an electronic submission – in English.)

Key words

(2-5 keywords, separated by commas)

Spis treści

1 Wstęp	1
2 Analiza tematu	3
2.1 Detekcja położenia wału silnika	3
2.2 Regulacja sygnału sterującego	6
3 Założenia i narzędzia	9
3.1 Założenia	9
3.2 Narzędzia	9
4 Projekt i wykonanie	11
5 [Właściwy dla kierunku – np. Specyfikacja wewnętrzna]	13
6 Weryfikacja i walidacja	15
7 Podsumowanie i wnioski	17
Bibliografia	20
Spis skrótów i symboli	23
Źródła	25
Lista dodatkowych plików, uzupełniających tekst pracy	27
Spis rysункów	29
Spis tabel	31

Rozdział 1

Wstęp

Robotyka to obszar badawczy i techniczny poświęcony teorii, konstrukcji oraz praktycznym zastosowaniom robotów. Elementami wykonawczymi układów zrobotyzowanych są najczęściej silniki lub siłowniki, te drugie nierzadko napędzane wewnętrznie silnikami. Rodzajem maszyny zamieniającej jeden rodzaj energii — w robotyce najczęściej elektryczną — na energię mechaniczną, czego celem jest wprawienie w ruch elementów ruchomych.

W przypadku prostych układów (Definicja 1), takich jak podajnik taśmowy napędzany pojedynczym silnikiem, dokładność (Definicja 3) sterowania nie ma wysokiego priorytetu. Najważniejsze jest, by element znajdujący się na taśmie przejechał z punktu A do punktu B z pewną prędkością, a jego położeniem zajmą się inne czujniki. Jednak gdy silnik napędza ramię robota, pojazd lub drona, ważne jest, by utrzymywał stałą prędkość i/lub wykonywał określoną ilość obrotów.

Definicja 1 (Układ sterowania). *Układ służący do kontroli pożądanego urządzenia przy pomocy wybranego zasobu narzędzi, w tym zamkniętej pętli z ujemnym sprzężeniem zwrotnym (Definicja 2).*

Definicja 2 (Pętla). *Typ struktury układu umożliwiający mu reakcję na informację zwrotną o jego stanie (sprzężenie zwrotne) pochodzącej z czujników.*

Definicja 3 (Dokładność). *Stopień zgodności pomiędzy rzeczywistymi wartościami a wartościami określonymi lub mierzonymi.*

Z tego powodu, jednym z wyzwań, z jakimi mierzyli się pionierzy automatyczno-robotyczni jest dokładne sterowanie tworzonymi przez siebie układami. Jest to kwestia o tyle istotna, że gdy odpowiedź układu odbiega — nawet w niewielkim stopniu — od wartości zadanej, staje się on znaczowo trudniejszy w użytkowaniu (sterowaniu), a w skrajnych przypadkach bezużyteczny. W przypadku ramienia robota, brak dokładności sterowania doprowadzi układ do osiągnięcia innej lokalizacji niż pożądana. W przypadku drona, prawdopodobnie całkowicie uniemożliwi lot z powodu nierówności sił nośnych. Zaś w przypadku po-

jazdów autonomicznych, przejechanie odległości innej niż zadana przez operatora. Jako rozwiązanie tego problemu, powstał poddział robotyki zwany odometrią (Definicja 4).

Definicja 4 (Odometria). *Dział nauk technicznych na pograniczu robotyki i miernictwa, zajmujący się użyciem różnego rodzaju czujników w celu oszacowania położenia ruchomego układu względem pozycji startowej w przestrzeni fizycznej.*

Współcześni automatycy-robotycy będący na początku swojej ścieżki edukacji/kariery, lub zajmujący się robotyką jedynie hobbystycznie, również mierzą się przedzej czy później z problemem dokładności sterowania układu. W obecnych czasach istnieje wiele sposobów rozwiązania go.

Celem niniejszej pracy inżynierskiej jest zaprojektowanie i wykonanie fizycznego modelu platformy mobilnej (zwanej dalej pojazdem) oraz aplikacji do jej kontroli. Następnie zastosowanie i przetestowanie eksperymentalne wybranej metody zwiększenia dokładności układu z użyciem ujemnego sprzężenia zwrotnego. Na końcu otrzymane wyniki zostaną przeanalizowane pod kątem użyteczności i skuteczności wybranej metody w warunkach rzeczywistych.

Praca podzielona została na następujące rozdziały[10]:

1. Wstęp — wprowadzenie do tematu, krótkie omówienie istoty problemu, zakres pracy, opis rozdziałów.
2. Analiza tematu — omówienie tematu w kontekście aktualnego stanu wiedzy o poruszonym problemie (ang. *state of art*), oraz szczegółowe jego sformułowanie.
3. Założenia i narzędzia — opis wymagań postawionych przy tworzeniu projektu wraz z uzasadnieniem wyboru, a także lista użytych narzędzi.
4. Projekt i wykonanie — szczegółowe omówienie sposobu wykonania modelu pojazdu, układu elektronicznego, aplikacji, kodu mikroprocesora i narzędzi pomocniczych. Każdemu elementowi odpowiada podrozdział.
5. Weryfikacja i walidacja — zastosowane metody badawcze i wykonane eksperymenty, oraz napotkane i usunięte błędy.
6. Podsumowanie i wnioski — skomentowanie uzyskanych wyników pod kątem osiągnięcia założonych celów, analiza i dalsze kroki.

Rozdział 2

Analiza tematu

2.1 Detekcja położenia wału silnika

Problem synchronizowania silników elektrycznych znany jest w dziedzinie automatyki od dziesiątek lat. Początki badania silników sięgają XIX wieku, kiedy to Michael Faraday oraz inni naukowcy eksperymentowali ze wykorzystaniem elektromagnetyzmu[2]. Pierwsze silniki elektryczne były prymitywne i nie miały zaawansowanych metod sterowania. Wczesne próby pozycjonowania opierały się głównie na prostych mechanizmach, takich jak przekładnie i sprzęgła.

W miarę postępu technologicznego, szczególnie w XX wieku, rozwijano bardziej zaawansowane metody pozycjonowania. Pojawiły się pierwsze systemy sterowania, wykorzystujące technologię zwrotną informacji, mającą na celu monitorowanie i regulację położenia wałów silników. Jednak precyzja tych rozwiązań była ograniczona, a dokładność pozycjonowania nie zawsze spełniała wymagania coraz bardziej zaawansowanych zastosowań.

Dopiero wprowadzenie enkoderów (Definicja 5) elektronicznych w latach 60. XX wieku[9] stało się przełomem.

Definicja 5 (Enkoder obrotowy). *Urządzenie, generujące sygnały elektryczne odpowiadające ruchowi obrotowemu wału silnika celem określenia jego pozycji.*

Początkowo enkodery były oparte na szczotkach stykających się z dyskiem zawierającym serię odpowiednio zakodowanych pierścieni koncentrycznych (Rysunek 2.1), wypełnionych otworami o odpowiedniej długości[6]. Są one tanie w produkcji, jednak mają swoje ograniczenia związane ze zużyciem mechanicznym elementów stykowych, niską maksymalną dozwoloną prędkością silnika i wymaganiami konserwacji. Ten typ enkoderów spotykany jest do dziś, na przykład w multimetraчach cyfrowych.

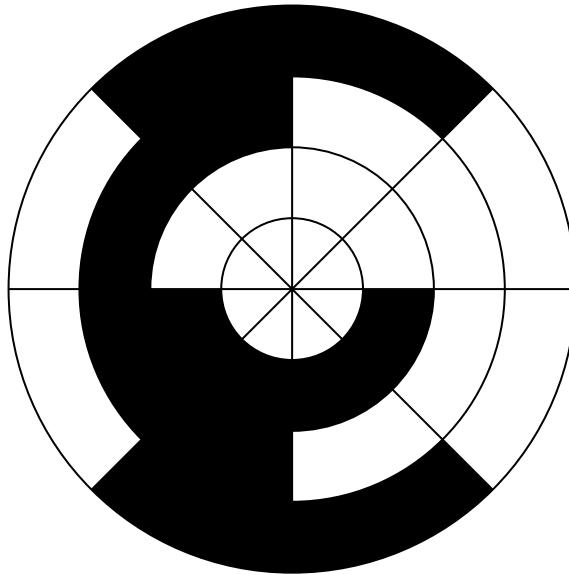
Rozwój technologii przyniósł enkodery optyczne, wykorzystujące diody LED i fotodetektory. Później pojawiły się enkodery magnetyczne. To właśnie one — enkodery optyczne

i magnetyczne — są do dnia dzisiejszego najczęściej spotykane i oferują najwyższą dokładność sterowania przy niskich kosztach i niewielkim stopniu skomplikowania. To właśnie na nich skupiono się w dalszej części pracy.

Enkodery można podzielić ze względu na[6]:

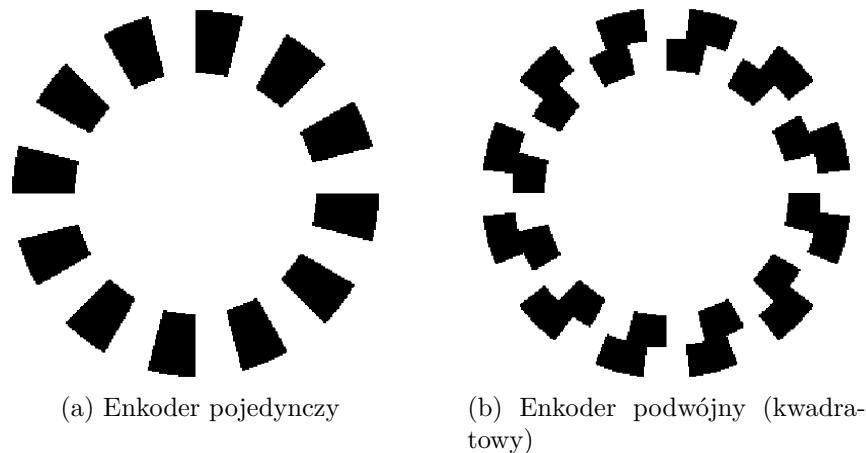
- Metodę używaną do odczytania pozycji: kontaktowe i bezkontaktowe.
- Rodzaj sygnału wyjściowego: pozycja absolutna lub szereg inkrementujących/dekrementujących wartości.
- Zjawisko fizyczne wykorzystane do przesłania sygnału pozycyjnego: przewodzenie elektryczne, magnetyzm, zjawiska optyczne lub pojemnościowe.

Najważniejszy jest podział ze względu na rodzaj sygnału wyjściowego. Mimo, że zarówno enkodery absolutne jak i inkrementalne posiadają dyski kodujące, różnią się one działaniem. Enkodery absolutne jako sygnał wyjściowy podają precyzyjną pozycję wału silnika, najczęściej zakodowaną w słowie bitowym. Przykładowy wygląd dysku kodującego widoczny jest na Rysunku 2.1. Istotną cechą tego rodzaju enkoderów jest możliwość określenia pozycji nawet po utracie zasilania.



Rysunek 2.1: Poglądowy schemat dysku enkodera absolutnego z 3-bitowym kodem Graya[3]

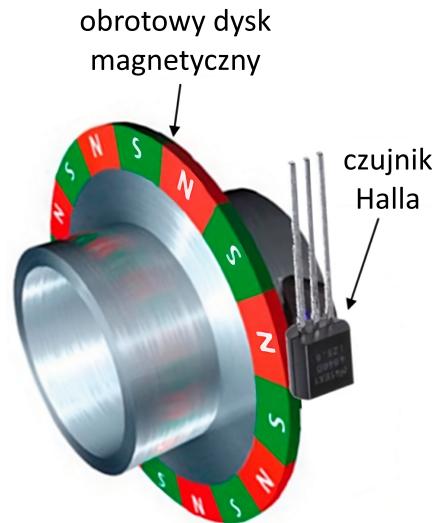
Enkodery inkrementalne u podstaw działają w ten sam sposób, tzn. opierają się na dyskach kodujących, z tą różnicą, że nie są w stanie podać dokładnej wartości położenia. Zamiast tego, podają na wyjściu odpowiedni impuls przy obrocie w danym kierunku. Następnie w oprogramowaniu impulsy te są zliczane w celu oszacowania aktualnej pozycji względem pozycji startowej. Ze względu na wyzerowanie liczby impulsów przy utracie zasilania, ten typ enkodera nie jest w stanie podać dokładnej pozycji w przypadku utraty zasilania.



Rysunek 2.2: Poglądowe schematy dysku enkodera inkrementalnego [5]

Istotny jest również podział enkoderów ze względu na wykorzystywane zjawisko fizyczne. Dwa główne typy to enkodery optyczne oraz magnetyczne. Oba rodzaje występują zarówno w wariantie pojedynczym (Rysunek 2.2a) jak i podwójnym (Rysunek 2.2b). W przypadku enkoderów optycznych, kolorowi białemu odpowiada szczelina, zaś kolorowi czarnemu blokada. W przypadku enkoderów magnetycznych, kolorom odopowiadają biegunki S i N.

Jako że w projekcie wykorzystane zostały enkodery magnetyczne, zasada ich działania została opisana, zaś enkodery optyczne pominięto. W enkoderze magnetycznym umieszcza się magnesy na obracającej się lub przemieszczającej się części obiektu — czyli dysku — a czujniki magnetyczne — najczęściej czujniki Halla (Definicja 6) — znajdujące się na stałej części enkodera rejestrują zmiany pola magnetycznego (Rysunek 2.3).



Rysunek 2.3: Zobrazowanie zasady działania enkodera magnetycznego dla tarczy z jednym рядом[8]

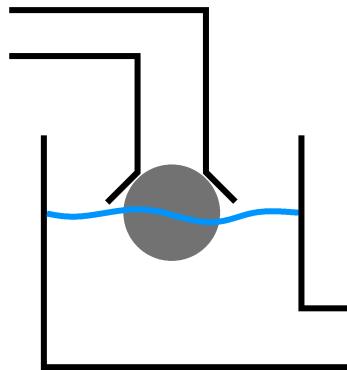
Definicja 6 (Czujnik Halla). *Czujnik pola magnetycznego i prądu, wykorzystujący zjawisko Halla.*

Te zmiany są następnie przetwarzane na sygnały elektryczne, które można interpretować jako informacje o kącie obrotu lub przemieszczeniu. Enkodery magnetyczne charakteryzują się wysoką dokładnością pomiaru, odpornością na wibracje i brakiem kontaktu mechanicznego, dzięki czemu są odporne na zabrudzenia i czynniki zewnętrzne takie jak kurz. Nie ma więc potrzeby osadzania ich w zamkniętej przestrzeni, jak to ma miejsce z czujnikami optycznymi.

2.2 Regulacja sygnału sterującego

Oprócz urządzenia (czujnika) dostarczającego sygnał informujący o fizycznym położeniu lub przemieszczeniu wału silnika, konieczne jest również zastosowanie metody wyznaczenia sygnału sterującego u .

Trudno jest określić datę powstania pierwszych regulatorów. Pierwotnie nie były one tworzone z myślą o wyznaczaniu sygnału sterującego, lecz zwyczajnie jako część urządzeń. Przykładem jednego z pierwszych regulatorów może być maszyna Ktesibiosa — wynalezionej w III wieku p.n.e.[1] — w której rolę regulatora pełnił pływak dławiący wypływającą ze źródła wodę (Rysunek 2.4). Jest to prawdopodobnie pierwszy na świecie przykład regulatora proporcjonalnego.



Rysunek 2.4: Zobrazowanie zasady działania regulatora Ktesibiosa

Na przestrzeni kolejnych tysięcy lat w technologii regulatorów nie dokonał się w zasadzie żaden znaczący postęp. Dopiero w XIX i XX wieku rozpoczęły się badania nad teorią sterowania, w których udział miało wielu naukowców z całego świata. Lata prac doprowadziły do formalnego opracowania w roku 1922 regulatora PID (ang. *Proportional–Integral–Derivative*) (Definicja 7) przez rosyjskiego naukowca, Nicolasa Minorsky'ego[4].

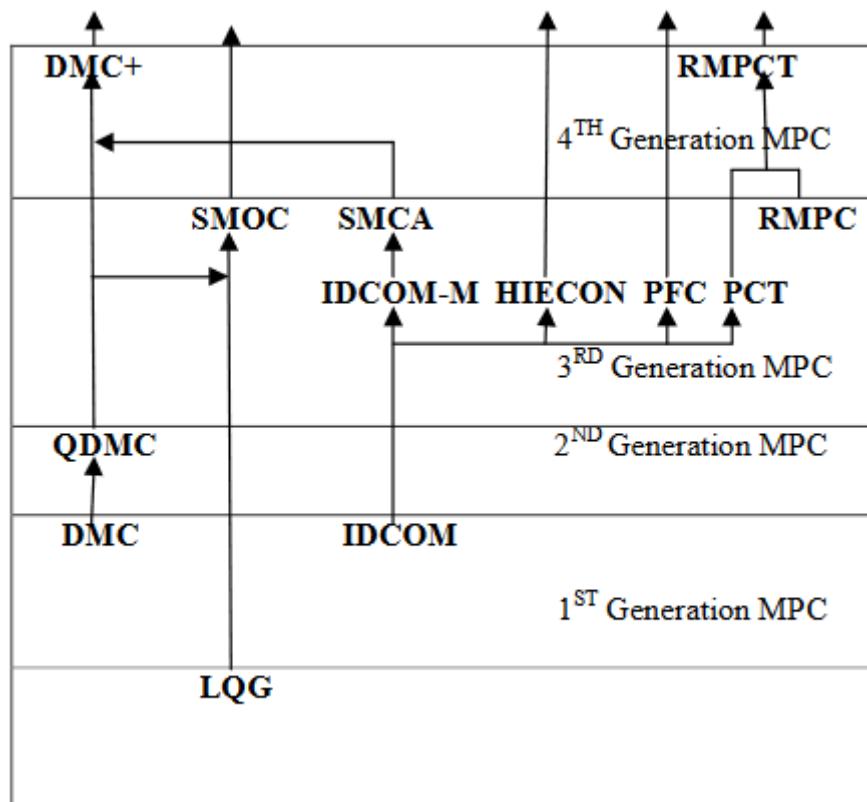
Definicja 7 (Regulator PID (Proporcjonalno-Integrująco-Różniczkujący)). *Rodzaj regulatora, który składa się z trzech elementów: proporcjonalnego (P), który reaguje na bieżącą wartość błędu (Definicja 8) proporcjonalnie do niego; całkującego (I), który integruje bieżący błąd w czasie i reaguje na jego sumę; oraz różniczkującego (D), które reaguje na szybkość zmiany błędu.*

Definicja 8 (Błąd; uchyb). W układach automatyki jest to różnica między wartością zadaną a zmierzoną wartością rzeczywistą.

Jego popularyzacja nastąpiła w latach '50 XX wieku, gdy układy elektroniczne stały się tańsze, dotepniejsze i bardziej niezawodne. Dziś jest powszechnie stosowany w automatyce, robotyce, elektronice i wielu innych dziedzinach inżynierii. Regulator PID jest stosowany najczęściej ze względu na prostotę, bardzo niski koszt implementacji i wystarczające działanie w większości przypadków.

Drugim najczęściej stosowanym regulatorem jest regulator predykcyjny MPC (ang. *Model Predictive Control*). W przeciwieństwie do tradycyjnych regulatorów które reagują na sprzężenie zwrotne z wyjścia układu, regulator predykcyjny działa z wyprzedzeniem, zanim zdąży nastąpić zmiana na wyjściu układu.

Pierwsze wzmianki o tym typie kontroli datowane są na wczesne lata '60 XX wieku i rozwijania Rudolfa E. Kálmána na temat systemów liniowych. Od tego czasu, technologia regulatora predykcyjnego była rozwijana niezależnie przez wiele osób i instytucji. W późnych latach '70 XX wieku regulator ten można było już spotkać w zastosowaniach przemysłowych. W roku 1979 zaprezentowano generację pierwszą, zaś najnowszą, 4 generację stanowią w roku 1998[7]. Pełna genealogia algorytmów MPC przedstawiona została na Rysunku 2.5.



Rysunek 2.5: Genealogia algorytmów MPC[7]

Regulatory predykcyjne znajdują zastosowanie w układach o dużym opóźnieniu i wysokim rzędzie, gdzie regulatory PID są niewystarczające. Przykładem są sondy kosmiczne.

Rozdział 3

Założenia i narzędzia

3.1 Założenia

- wymagania funkcjonalne i niefunkcjonalne
- przypadki użycia (diagramy UML) – dla prac, w których mają zastosowanie
- opis narzędzi, metod eksperymentalnych, metod modelowania itp.
- metodyka pracy nad projektowaniem i implementacją – dla prac, w których ma to zastosowanie

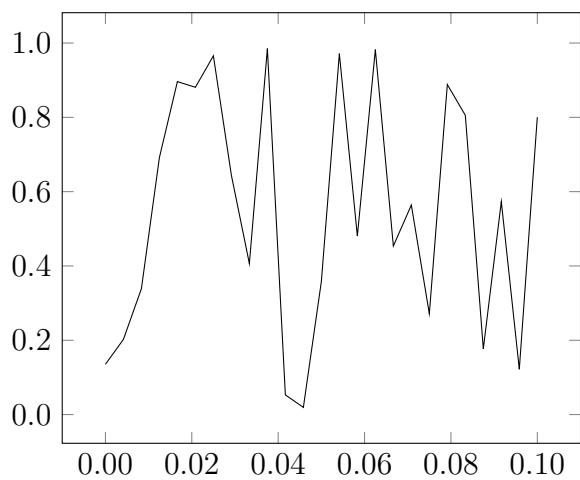
3.2 Narzędzia

Rozdział 4

Projekt i wykonanie

Jeśli „Specyfikacja zewnętrzna”:

- wymagania sprzętowe i programowe
- sposób instalacji
- sposób aktywacji
- kategorie użytkowników
- sposób obsługi
- administracja systemem
- kwestie bezpieczeństwa
- przykład działania
- scenariusze korzystania z systemu (ilustrowane zrzutami z ekranu lub generowanymi dokumentami)



Rysunek 4.1: Podpis rysunku po rysunkiem.

Rozdział 5

[Właściwy dla kierunku – np. Specyfikacja wewnętrzna]

Jeśli „Specyfikacja wewnętrzna”:

- przedstawienie idei
- architektura systemu
- opis struktur danych (i organizacji baz danych)
- komponenty, moduły, biblioteki, przegląd ważniejszych klas (jeśli występują)
- przegląd ważniejszych algorytmów (jeśli występują)
- szczegóły implementacji wybranych fragmentów, zastosowane wzorce projektowe
- diagramy UML

Krótką wstawka kodu w linii tekstu jest możliwa, np. `int a;` (biblioteka `listings`). Dłuższe fragmenty lepiej jest umieszczać jako rysunek, np. kod na rys 5.1, a naprawdę długie fragmenty – w załączniku.

```
1 class test : public basic
2 {
3     public:
4         test (int a);
5         friend std::ostream operator<<(std::ostream & s,
6                                         const test & t);
7     protected:
8         int _a;
9
10 };
```

Rysunek 5.1: Pseudokod w listings.

Rozdział 6

Weryfikacja i walidacja

- sposób testowania w ramach pracy (np. odniesienie do modelu V)
- organizacja eksperymentów
- przypadki testowe zakres testowania (pełny/niepełny)
- wykryte i usunięte błędy
- opcjonalnie wyniki badań eksperymentalnych

Tabela 6.1: Nagłówek tabeli jest nad tabelą.

ζ	metoda							
	alg. 1	alg. 2	alg. 3			alg. 4, $\gamma = 2$		
			$\alpha = 1.5$	$\alpha = 2$	$\alpha = 3$	$\beta = 0.1$	$\beta = -0.1$	
0	8.3250	1.45305	7.5791	14.8517	20.0028	1.16396	1.1365	
5	0.6111	2.27126	6.9952	13.8560	18.6064	1.18659	1.1630	
10	11.6126	2.69218	6.2520	12.5202	16.8278	1.23180	1.2045	
15	0.5665	2.95046	5.7753	11.4588	15.4837	1.25131	1.2614	
20	15.8728	3.07225	5.3071	10.3935	13.8738	1.25307	1.2217	
25	0.9791	3.19034	5.4575	9.9533	13.0721	1.27104	1.2640	
30	2.0228	3.27474	5.7461	9.7164	12.2637	1.33404	1.3209	
35	13.4210	3.36086	6.6735	10.0442	12.0270	1.35385	1.3059	
40	13.2226	3.36420	7.7248	10.4495	12.0379	1.34919	1.2768	
45	12.8445	3.47436	8.5539	10.8552	12.2773	1.42303	1.4362	
50	12.9245	3.58228	9.2702	11.2183	12.3990	1.40922	1.3724	

Rozdział 7

Podsumowanie i wnioski

- uzyskane wyniki w świetle postawionych celów i zdefiniowanych wyżej wymagań
- kierunki ewentualnych danych prac (rozbudowa funkcjonalna . . .)
- problemy napotkane w trakcie pracy

Bibliografia

- [1] Wielu edytorów. *Ctesibius Of Alexandria*. URL: <https://www.britannica.com/biography/Ctesibius-of-Alexandria> (term. wiz. 29.12.2023).
- [2] Michael Faraday. „On some new Electro-Magnetical Motions, and on the Theory of Magnetism.” W: *The Quarterly Journal of Science, Literature and The Arts* 12 (1822), s. 74–96.
- [3] jjbeard. *A Rotary Encoder Disc with a 3-Bit Binary Reflected Gray Code (BRGC)*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_encoder#/media/File:Encoder_Disc_\(3-Bit\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_encoder#/media/File:Encoder_Disc_(3-Bit).svg) (term. wiz. 27.12.2023).
- [4] Nicolas Minorsky. „DIRECTIONAL STABILITY OF AUTOMATICALLY STEERED BODIES”. W: *American Society of Naval Engineers* 34 (1922). ISSN: 0028-1425. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1922.tb04958.x.
- [5] Piotr Mitros. *Optical Encoder Project*. URL: <https://groups.csail.mit.edu/mac/users/pmitros/encoder/> (term. wiz. 28.12.2023).
- [6] University of Hawaii NASA Infrared Telescope Facility (IRTF) Institute for Astronomy. *Techniques For Digitizing Rotary and Linear Motion*. URL: http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~tcs3/tcs3/0306_conceptual_design/Docs/05_Encoders/encoder_primer.pdf (term. wiz. 27.12.2023).
- [7] Ruchika i Neha Raghu. „Model Predictive Control: History and Development”. W: *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)* 4 (2013). ISSN: 2231-5381.
- [8] Jonathan Seybold, André Bülow, Karl-Peter Fritz, Alexander Frank, Cor Scherjon, Joachim Burghartz i André Zimmermann. „Miniaturized Optical Encoder with Micro Structured Encoder Disc”. W: *Applied Sciences* 9 (2019). DOI: 10.3390/app9030452.
- [9] C. F. Winder. „Shaft Angle Encoders”. W: *Electronic Industries* 18.10 (1959), s. 76–80.

- [10] Politechnika Śląska. *Wymagania do pracy inżynierskiej dla kierunku Automatyka i Robotyka*. 2021. URL: https://www.polsl.pl/rau/wp-content/uploads/sites/42/2021/11/AiR_Wymagania_do_pracy_inzynierskiej.pdf (term. wiz. 27.12.2023).

Dodatki

Spis skrótów i symboli

u sygnał sterujący obiektem wykonawczym w układzie sterowania/regulacji

PID regulator Proporcjonalno-Całkujaco-Różniczkujący (ang. *Proportional–Integral–Derivative*)

MPC regulator oparty na modelu predykcyjnym (ang. *Model Predictive Control*)

Źródła

Jeżeli w pracy konieczne jest umieszczenie długich fragmentów kodu źródłowego, należy je przenieść w to miejsce.

```
1 if (_nClusters < 1)
2     throw std::string ("unknown number of clusters");
3 if (_nIterations < 1 and _epsilon < 0)
4     throw std::string ("You should set a maximal number of
5         iteration or minimal difference --- epsilon .");
6 if (_nIterations > 0 and _epsilon > 0)
7     throw std::string ("Both number of iterations and minimal
8         epsilon set --- you should set either number of iterations
9         or minimal epsilon .");
```

Lista dodatkowych plików, uzupełniających tekst pracy

W systemie do pracy dołączono dodatkowe pliki zawierające:

- źródła programu,
- dane testowe,
- film pokazujący działanie opracowanego oprogramowania lub zaprojektowanego i wykonanego urządzenia,
- itp.

Spis rysunków

2.1	Poglądowy schemat dysku enkodera absolutnego z 3-bitowym kodem Graya[3]	4
2.2	Poglądowe schematy dysku enkodera inkrementalnego [5]	5
2.3	Zobrazowanie zasady działania enkodera magnetycznego dla tarczy z jednym rzędem[8]	5
2.4	Zobrazowanie zasady działania regulatora Ktesibiosa	6
2.5	Genealogia algorytmów MPC[7]	7
4.1	Podpis rysunku po rysunkiem.	12
5.1	Pseudokod w <i>listings</i>	14

Spis tabel

6.1 Nagłówek tabeli jest nad tabelą.	16
--------------------------------------	----